

激光焊接 TRIP590 钢焊缝微观结构及形成机理研究

景财年¹ 范吉超¹ 王丛雷¹ 徐淑波¹ 刘 鹏¹ 李怀学²

¹山东建筑大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250101

²北京航空制造工程研究所, 北京 100084

摘要 通过扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射分析(EBSD),研究了TRIP590钢激光焊接接头的界面微观结构和形成机理。SEM分析表明,焊接接头焊缝区组织为马氏体组织,热影响区组织主要是贝氏体和铁素体,离焊缝位置越近,马氏体量越多。EBSD分析表明,母材区的晶粒分布均匀,都是大角度晶界,没有明显的择优取向。热影响区晶粒大小不均,贝氏体有相同或相近的取向。焊缝区板条尺寸最为粗大,有明显的织构。残余奥氏体弥散分布在晶粒内部或晶界,焊缝和热影响区晶界取向差都是 $1^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 之间的小角度晶界,大量的小角度晶界导致焊缝与热影响区的塑性要小于母材。

关键字 光学制造;激光焊接;电子背散射分析;焊缝;微观结构;形成机理

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0403004

Characterization and Formation Mechanism of the Weld Interface of TRIP590 Steel Laser Welding

Jing Cainian¹ Fan Jichao¹ Wang Conglei¹ Xu Shubo¹ Liu Peng¹ Li Huaixue²

¹School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China

²Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100084, China

Abstract Scanning electron microscopy (SEM) and electron backscatter diffraction (EBSD) are used to study the interface microstructure and formation mechanism of laser welding joints of TRIP590 steel. Analyses of SEM indicate that the microstructure of weld zone is martensite, and the microstructure of heat affected zone (HAZ) are bainite and ferrite. The closer of the weld, the more martensite HAZ has. The results of EBSD analysis show that there is no obvious preferred orientation and uniform sizes of grains in base zone, and most of grain boundaries are high angle grain boundaries. The grain size of HAZ is unequal and the bainite has the same or similar orientation. The laths size of weld zone is coarser and it has obvious texture. Retained austenite is dispersed in grains and grain boundaries. The orientation difference of grain boundary of weld and HAZ is low-angle boundary which is between $1^{\circ}\sim 5^{\circ}$. A large amount of low-angle boundary would lead to the plasticity loss of weld and HAZ compared with base metal.

Key words optical fabrication; laser welding; electron backscatter diffraction; weld; microstructure; formation mechanism

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 140.3580; 160.3900

1 引言

激光焊接是通过高密度的激光束作为热源进行焊接的一种现代高效的焊接方法,高强钢的激光焊接已成为汽车工业的典型工艺,应用广泛^[1-2]。TRIP钢作为汽车用高强钢的典型钢种,具有贝氏体、铁素体和残余奥氏体复相组织,激光焊接接头的组织变化更为复杂,亟待开展系列研究。目前还没有具体针对低碳低合

收稿日期: 2014-11-04; 收到修改稿日期: 2014-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(51305240)、山东省科技发展计划(2013GGX10306)

作者简介: 景财年(1973—),男,博士,副教授,主要从事汽车用高强钢方面的研究。E-mail: jcn55@163.com

金高强度钢在激光焊接后焊缝区和热影响区晶粒取向相对于母材发生变化的研究^[3-5],焊接接头内部微观结构对组织性能的影响也没有详细的表述。虞等^[6]研究了材料性能差异对焊缝微观组织与宏观性能的影响,焊接熔池的形成、演化机制,熔池凝固过程焊接缺陷及残余应力形成等。作者前期工作研究了不等厚异种钢的激光拼焊板性能,为拼焊板的推广应用提供理论和试验研究^[7]。电子背散射衍射(EBSD)技术是新型扫描电镜(SEM)中一个具有特殊功能的附件,可以测量晶体取向、晶界性质、位向差、物相分析和形变分析等^[8-10]。本文通过对汽车用高强度钢 TRIP590 焊缝区和母材的 EBSD 分析,研究了其微观结构的特征,并进一步探讨了焊缝界面组织的形成机理,以期对 TRIP 钢在汽车领域的应用提供重要的试验与理论基础。

2 试验材料与方法

试验采用宝钢生产的 1.5 mm 厚的 TRIP590 钢板,采用 Trumpf Hass Laser 生产的 Trumpf HL3006D 型连续 Nd:YAG 激光器对 TRIP590 钢板进行激光焊接,抗拉强度为 600 MPa,延伸率为 40%。焊接功率为 2500 W,焊接速度为 5 m/min,离焦量为 0 mm,激光器焦距为 150 mm。试验中采用 Ar 气进行保护,气体流量为 20 L/min。焊后利用线切割切取试样,抛光后用 4% 硝酸乙醇溶液进行腐蚀。采用 SEM 对焊接接头的显微组织结构进行观察和分析。将扫描后的试样先进行机械抛光,后用 50% 的硅溶胶溶液抛光 1 h 左右,用 EBSD 分析仪在场发射 SEM 进行观察,分别对母材区、焊缝区和热影响区的晶粒取向成相图和晶粒尺寸进行分析。

3 结果及分析

3.1 焊接接头微观组织 SEM 分析

焊接接头在 SEM 下的微观组织如图 1 所示,图中可以看出焊缝区晶粒形状主要是粗大的柱状晶,图中箭头的方向是激光焊接时热量传递的方向,柱状晶的生长方向与热量传递的方向相反。从图 1 中可以看出,激光焊接的熔合区和热影响区(HAZ)都比较窄,这是因为激光焊接加热速度快,能量集中。因为焊接过程中熔池合金元素烧损比较严重,使熔池中作为晶核的质点大大减少,促使焊缝容易形成柱状晶^[11-12]。

图 2 所示是整个焊接接头的微观组织图,图 3 是对应图 2 中的各个不同区域的微观组织图。从图 2 中可以看出,焊接后接头的熔合区很窄,成一条线,熔合区的左侧为热影响区,熔合区的右侧为焊缝熔化区。因为焊接过程热源的移动,所以焊缝熔池金属是在动态下结晶的。如图 2 所示,图 2(a)区域左边是未受影响的母材区,图 3(a)表示的是焊接热影响区微观组织,从图中可以看出,激光焊接的热影响区与普通焊接相比比较窄,焊接热影响区主要是由铁素体+贝氏体+少量的残余奥氏体组成,焊接热影响区的温度在 Fe-C 二元相图中处于 Ac₃ 与 Ac₁ 温度之间,没有达到熔点,所以这部分金属没有进行重熔,只是发生了固态相变。图 3(b)为熔合线区域,从图 2 和图 3 中可以明显看出,在靠近热影响区的部分,主要是贝氏体和铁素体,但是组织较粗大,在靠近焊缝区的部分,出现了少量的马氏体,该区域温度在 Fe-C 二元相图中处于两相区。图 3(c)、(d)为焊缝熔化区微观组织,焊缝区的组织主要是板条马氏体组织,c 区靠近熔合区,焊接时热量不充足,所以马氏体组织比较凌乱,不规律。而 d 区是焊缝中心处,是整个焊接过程温度最高的区域,冷却速度快,相对于熔合线附近的焊缝区过冷度稍低,形成的马氏体板条也较宽,又由于焊缝中心处的高温以及熔池的搅拌作用,使熔融奥氏体更加纯净,得到的马氏体组织均匀。

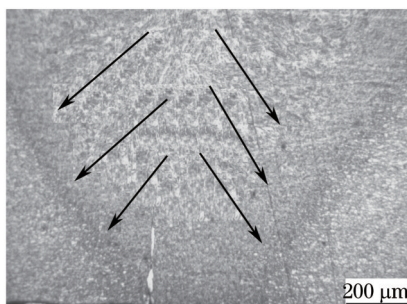


图 1 焊缝热量传递示意图

Fig.1 Heat transfer sketch map of weld

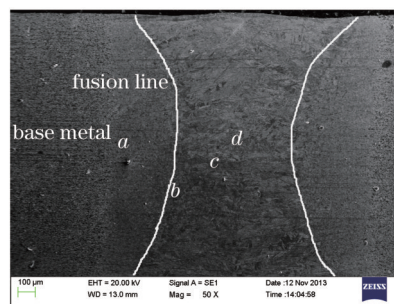


图 2 焊接接头微观组织

Fig.2 Microstructure of welding joint

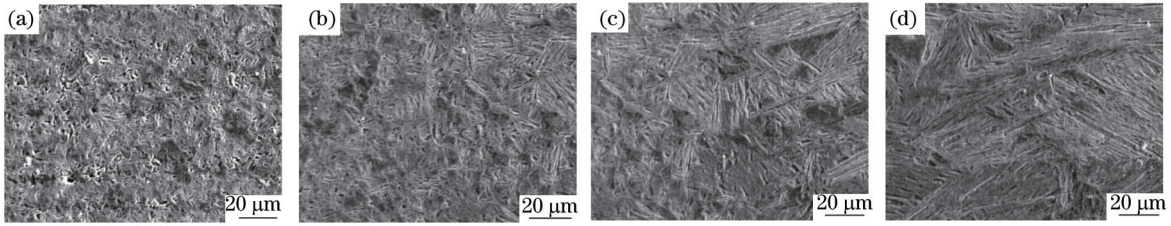


图3 接头各区域微观组织。(a)热影响区细晶区;(b)焊接熔合区;(c)近熔合线的焊缝区;(d)焊缝中心区

Fig.3 Microstructure of each area in joint. (a) Fine grained area of HAZ; (b) welding fusion zone; (c) weld zone close to the fusion line; (d) weld center

焊接接头不同区的组织不同是因为每个区域所受到的热循环不同造成的。焊缝熔化区的温度最高,冷却速度也最快,离熔化区越远的地方,焊接温度和冷却速度也相应降低。

3.2 焊接接头的晶界 EBSD 分析

图4是接头各区域(IPF)晶粒着色图和晶粒取向图,从取向分布图上可以直观地看出焊缝、热影响区和母材3个区域组织大小形态有差异:母材的晶粒尺寸均匀,晶粒形态为细小等轴晶;焊缝区由粗大的晶粒组成;而热影响区的晶粒尺寸介于两者之间。从IPF晶粒着色图中看出母材晶粒颜色取向分布均匀,尺寸较小,没有明显的择优取向,图4(a)中红色的小点为残余奥氏体,残余奥氏体弥散分布在铁素体晶粒上或者分布在晶界上,残余奥氏体的含量为1.37%,母材区平均晶粒尺寸为 $3.84\ \mu\text{m}$;热影响区有效晶粒尺寸起伏较大,以绿色和蓝色晶粒取向为主[图4(b)],存在一定的择优取向,热影响区的晶粒尺寸为 $7\ \mu\text{m}$ 左右,残余奥氏体含量为0.115%;焊缝区晶粒主要以浅绿色和蓝色晶粒取向为主[图4(c)],焊缝区的IPF着色图绿色较多,焊缝区内板条马氏体有一定的择优取向,在马氏体板条间和板条内部存在少量的红色小点,粗柱状组织十分明显,晶粒尺寸大约为 $8\ \mu\text{m}$,残余奥氏体含量为0.2%,含量明显减少,对比晶粒取向图[图4(d)]得出焊缝区的晶粒取向主要为 $\langle 101 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 。

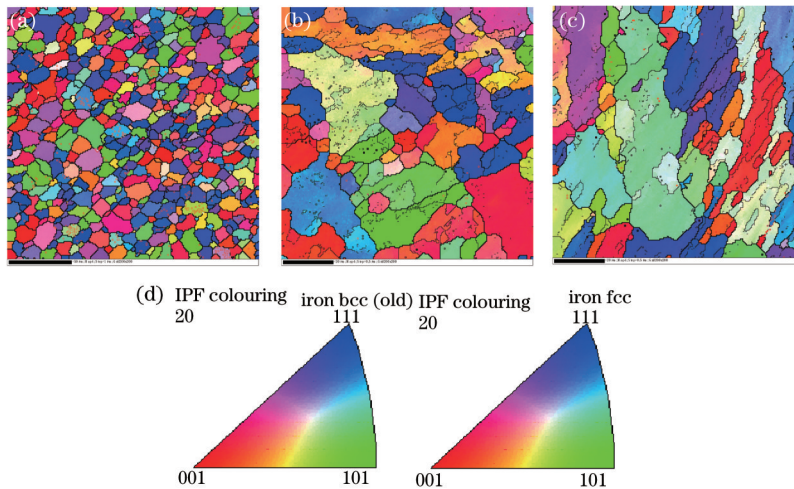


图4 接头各区域IPF着色图和晶粒取向图。(a)TRIP钢母材区;(b)热影响区;(c)焊缝区;(d)晶粒取向图

Fig.4 Color-patch map and grain orientation of each area in joint. (a) TRIP steel base zone; (b) heat affected zone; (c) weld zone; (d) grain orientation

由于激光焊接功率密度高,焊接熔池冷却速度快,整个接头区域经历热循环的时间不同引起焊缝和热影响区的晶粒粗化。焊缝区的晶粒明显粗大,焊缝区金属凝固过程中冷却速度很大,而且其中心和边缘之间的温度梯度也很大,柱状晶沿温度梯度最大的方向择优生长。熔池金属经历了高温熔化快速冷却的过程,发生了非扩散型马氏体转变,马氏体板条内有许多亚晶界,这说明焊缝区的组织不稳定,板条状马氏体向焊缝中心方向生长。由于焊缝熔池小,冷却速度快,未发生转变的残余奥氏体分布在马氏体板条内或者晶界处,与IPF着色图结果相对应。热影响区由于经历热循环的时间较短,此区晶粒是在原有母材晶粒基础上长大形成的,经历了保温长大的过程,继承母材组织的晶粒方向性,当晶体最易长大方向与散热最快方向一致

时,最有利于晶粒的生长,优先长大,而有的晶粒却由于取向不利于生长,与最快散热方向不一致而长到中途就停止了,所以晶粒分布不均,并且尺寸大小起伏,差异大。

图5是焊接接头各区域晶界取向差分布图,母材晶界取向差主要分布在35°~55°之间[图5(a)],说明整个扫描区域的晶界主要是大角度晶界,这些晶粒的取向差角度较大,这些大角度取向差对应着高能量的晶界。首先能够从组织中大角度晶界的间距得出有效的晶粒尺寸,并且大角度晶界的分布以及密度对钢材的强韧性有很大的影响,大角度晶界可以阻碍脆性裂纹的扩展,而高密度的大角度晶界可以使韧脆转变温度产生明显的降低^[13-14]。母材是通过控冷控轧工艺生产,属于低碳高强度薄板钢材,强韧性较好,母材的晶粒取向以及晶界分布图结果作出了有效地说明。

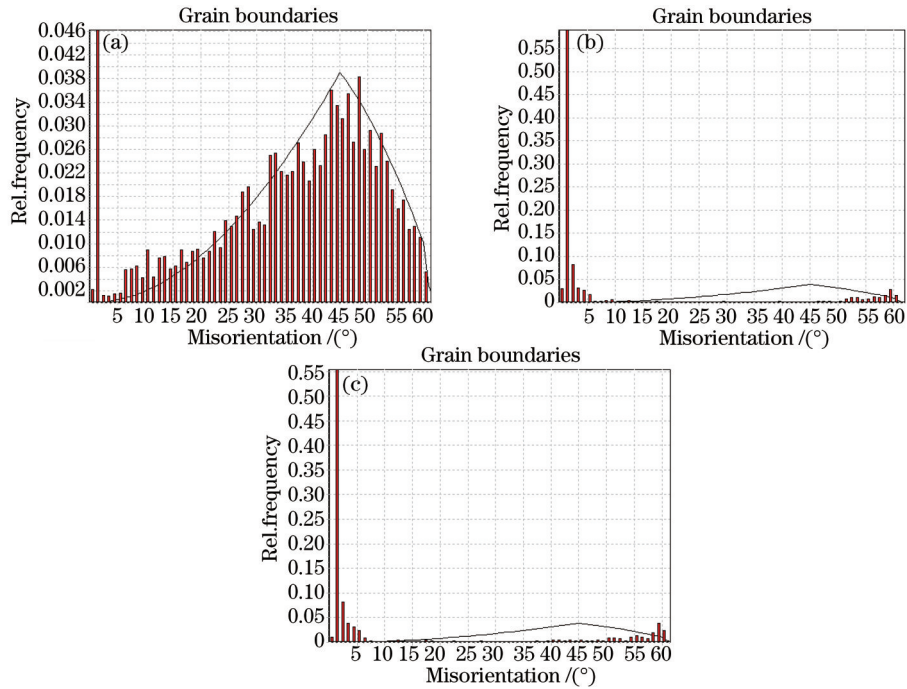


图5 接头各区域晶界取向差分布。(a)母材区;(b)热影响区;(c)焊缝区

Fig.5 Orientation difference distribution of grain boundary. (a) Base zone; (b) heat affected zone; (c) weld zone

从图5(b)中可以看出,热影响区晶粒取向主要为1°~5°的小角度晶界,这说明热影响区晶粒有一定的择优取向,焊缝晶界取向差也是1°~5°之间的小角度晶界[图5(c)],这也说明了焊缝区的晶粒有择优取向。小于5°的小角度晶界不是马氏体变体之间的取向差,而是源于马氏体板条间的取向差,主要存在于马氏体变体内部。由于焊缝区马氏体板条的形成起源于热影响区的基体组织,原始组织对马氏体的形成有束缚作用,马氏体不能自由变形并使周围组织的取向也发生了小角度的偏转,这些小角度取向差使马氏体变体间实际取向差和理论取向差存在偏差。晶界取向差在10°以下范围内^[15-16],表明这些晶粒具有相同或相近的晶体取向,与IPF着色图得出的结果一致。这些小角度晶界的能量由位错的能量决定,而晶粒间的取向差决定了位错密度,所以此处位错强化起主要的强化作用。结合上述分析说明焊缝以及热影响区的塑性低于母材。

图6为焊接接头各区域晶粒取向反极图以及极密度强度,在反极图中,极密度强度大于10之后择优取向比较明显。从图6(a)中得出,母材区晶粒取向极密度强度为4.04,说明母材没有明显的择优取向,与IPF着色图反映出的结果一样,三张反极图所表示的意思是母材的轧向与晶体学方向<001>基本平行;热影响区晶粒的最易生长方向为<101>,轧向晶粒密度强度为10.98[图6(b)],表明这些晶粒具有相同或相近的晶体取向,也对应于IPF着色图的结果以及晶界取向差分布,晶粒大小不均匀,主要是晶粒依赖于母材长大,再经历一个快速加热冷却过程,晶粒在长大合并过程中许多晶界来不及合并,还有部分母材原始亚稳定状态的晶粒发生相变;焊缝区晶粒密度强度明显大于母材和热影响区,极密度强度达到了15.39,说明有明显的择优取向。焊缝晶粒主要以HAZ和母材晶粒取向关系生长,<001>织构稍微有些减弱,但多出了<101>织构,如图6(c)所示。在马氏体板条上存在很多亚晶界,这是因为焊接熔化区是动态再结晶的过程,也是晶界不断合并

的过程,焊缝区主要是小角度晶界,小角度晶界属于稳定态,原子不易扩散,并且对位错的阻碍作用要小于大角度晶界,导致了马氏体塑性较低。

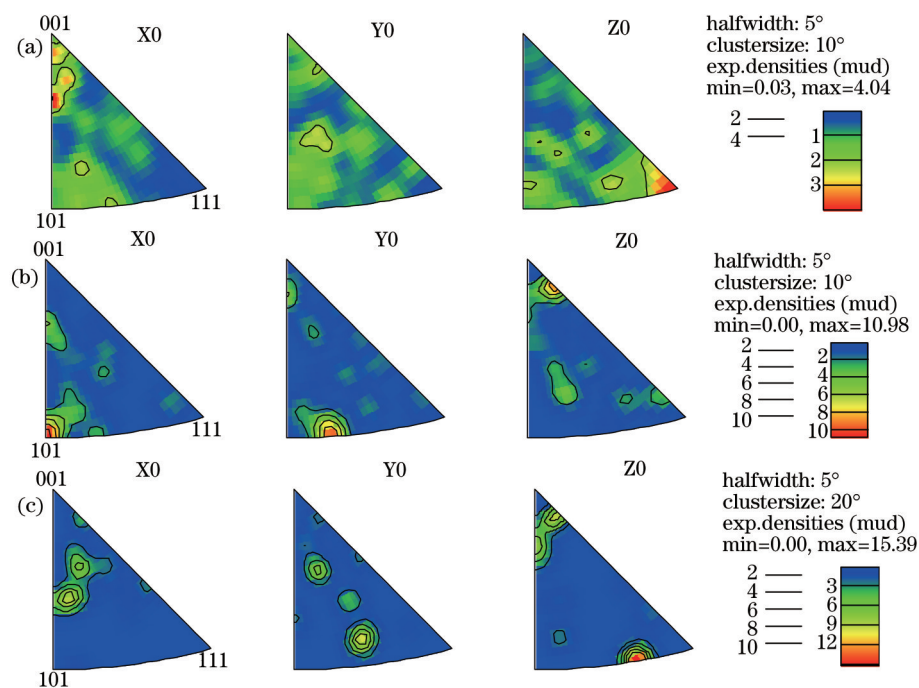


图6 接头各区域的晶粒取向反极图和极密度强度。(a)母材区;(b)热影响区;(c)焊缝区

Fig.6 Inverse pole figure and density intensity of grain orientation of each area of joint. (a) Base zone; (b) heat affected zone; (c) weld zone

4 结 论

经过SEM观察,焊接后的接头的熔合区很窄,焊缝区为马氏体组织,热影响区主要是贝氏体和铁素体,离焊缝位置越近,马氏体量越多。对焊接接头各区域进行EBSD分析,母材的晶粒分布均匀,都是大角度晶界,没有明显的择优取向。热影响区晶粒大小不均,贝氏体晶粒有相同或相近的取向,织构主要与晶体学方向<001>平行。焊缝区晶粒最为粗大,晶粒密度强度达到了15.39,有明显的织构,<001>织构稍微有些减弱,但多出了<101>织构。三个区域中都存在有残余奥氏体,弥散分布在晶粒内部或者晶界,焊缝和热影响区晶界取向差都是1°~5°之间的小角度晶界,小角度晶界的能量小于大角度晶界,会导致焊缝与热影响区的塑性要小于母材。

参 考 文 献

- 1 Peng Y, Qi Y H, He C H, *et al.*. Microstructure and its formation mechanism of weld metal of Al-bearing TRIP Steel[J]. Materials Science Forum, 2010, 638(4): 3591-3596.
- 2 Liu Qibin, Bai Lifeng. Microstructure and properties of ultra-high strength steel 30CrMnSiNi2A by laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2182-2186.
刘其斌,白丽锋. 超高强度30CrMnSiNi2A钢的激光焊接组织及性能[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2182-2186.
- 3 U Reisgen, M Schleser, O Mokrov, *et al.*. Optimization of laser welding of DP/TRIP steel sheets using statistical approach[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 255-262.
- 4 S R Niezgodna, R J McCabe, C N Tome, *et al.*. Quantification of strain and orientation measurement error in cross-correlation EBSD in hexagonal close-packed materials[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(10): 818-821.
- 5 T P Van, K Jochen, T Bohlke, *et al.*. Simulation of sheet metal forming incorporating EBSD data[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(12): 2659-2668.
- 6 Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie, *et al.*. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2182-2186.

- 2009, 36(2): 261–268.
- 虞 钢, 赵树森, 张永杰, 等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 261–268.
- 7 Jing Cainian, Fan Jichao, Ni Xiaomei, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser welded joints for dissimilar steel with different thicknesses[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803005.
- 景财年, 范吉超, 倪晓梅, 等. 激光焊接不等厚异种钢接头组织与性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803005.
- 8 Wang Guoqing, Song Zhihua, Wu Aiping, *et al.*. EBSD analysis of microstructure and texture of Ti₃Al alloy laser welded joints[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2011, 32(4): 63–66.
- 王国庆, 宋志华, 吴爱萍, 等. Ti₃Al激光焊接接头组织与结构的EBSD分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 63–66.
- 9 N A Bonasso, F Wagner, S Berbenni, *et al.*. A study of the heterogeneity of plastic deformation in IF steel by EBSD[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 548: 56–63.
- 10 D Howell, S Piazzolo, D P Dobson, *et al.*. Quantitative characterization of plastic deformation of single diamond crystals: A high pressure high temperature (HPHT) experimental deformation study combined with electron backscatter diffraction (EBSD) [J]. Diamond and Related Materials, 2012, 30: 20–30.
- 11 E Ahmed, U Reisgen, M Schleser, *et al.*. On formability of tailor laser welded blanks of DP/TRIP steel sheets[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(5): 337–342.
- 12 U Reisgen, M Schleser, O Mokrov, *et al.*. Statistical modeling of laser welding of DP/TRIP steel sheets[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 92–101.
- 13 S Wronski, J Tarasiuk, B Bacroix, *et al.*. Investigation of plastic deformation heterogeneities in duplex steel by EBSD[J]. Materials Characterization, 2012, 73: 52–60.
- 14 M Karlsen, J Hjelen, O Grong, *et al.*. SEM/EBSD based in situ studies of deformation induced phase transformations in supermartensitic stainless steels[J]. Materials Science and Technology, 2007, 24(1): 64–72.
- 15 F Bachmann, R Hielscher, H Schaeben, *et al.*. Grain detection from 2d and 3d EBSD data—Specification of the MTEX algorithm[J]. Ultramicroscopy, 2011, 111(12): 1720–1733.
- 16 M F Kartal, F P E Dunne, A J Wilkinson, *et al.*. Determination of the complete microscale residual stress tensor at a subsurface carbide particle in a single-crystal superalloy from free-surface EBSD[J]. Acta materialia, 2012, 60(13/14): 5300–5310.

栏目编辑: 张浩佳